

БАЗАРОВ ВАЛЕРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

СИНТЕЗ И ИОННО-ЛУЧЕВАЯ МОДИФИКАЦИЯ
АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЁНОК

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Handwritten signature of Valeriy Vyacheslavovich Bazarov in black ink, slanted upwards to the right.

КАЗАНЬ - 2003

Работа выполнена в лаборатории Радиационной физики Казанского физико-технического института имени Е.К.Завойского КазНЦ РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Файзрахманов Ильдар Абдулкабирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Богданова Халида Галимзяновна

кандидат физико-математических наук, доцент
Парфёнов Виктор Всеволодович

Ведущая организация: ФГУП НПО "Государственный институт
прикладной оптики", г.Казань

Защита состоится "13" КотлжО& 2003 г. в "4(> часов 00 минут на
заседании диссертационного совета Д212.082.01 при Казанском государственном
энергетическом университете по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, 51.

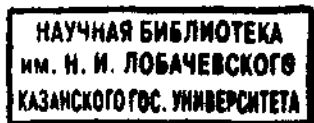
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного
энергетического университета.

Автореферат разослан "17" (Stdjig-oAjs) 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Володин А.Г.



Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Алмазоподобные плёнки углерода впервые были синтезированы в 1971 г. и с тех пор интерес к ним не ослабевает. По комплексу своих физико-химических и механических свойств они близки к алмазу, и это определяет широкую область их практического применения. Кроме того, они могут использоваться в качестве материалов для низковольтных эмиттеров, а также солнечных элементов, о чём свидетельствуют появившиеся в последнее время публикации.

Фундаментальный интерес к этим плёнкам определяется их необычной нанокластерной структурой. В отличие от классических аморфных полупроводников, таких как α -Si и α -Ge, структура плёнок образована алмазоподобной аморфной матрицей, в которую встроены фрагменты графитовых плоскостей манометрового размера - графитоподобные нанокластеры. При этом размеры и концентрация нанокластеров решающим образом влияют на все электронные свойства плёнок. В частности, благодаря размерному квантованию оптическая щель этих плёнок отлична от нуля и определяется средним размером нанокластеров.

Исследования последних лет свидетельствуют о том, что ионная имплантация является одним из эффективных методов создания нанокompозитных материалов. Другим не менее важным и интересным направлением в ионной имплантации может стать модификация, т.е. направленное изменение свойств уже созданных наноструктурных материалов. Здесь, как мы и ожидали, имеется принципиальное отличие от ионно-лучевой модификации однородных по структуре материалов, которое обусловлено малым размером структурных составляющих таких сред, в качестве которых, как правило, выступают наночастицы. Во-первых, близость границы, являющейся эффективным стоком радиационных дефектов, препятствует накоплению радиационных дефектов в наночастицах, что делает наноструктурные материалы в целом радиационно - устойчивыми. Во-вторых, манометровые размеры структурных составляющих приводят к тому, что взаимодействие каждого элемента даже с одним примесным

атомом или молекулой может кардинально изменить электронный спектр элемента и, следовательно, электронные свойства всего нанокompозита в целом.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является разработка физических основ применения ионной имплантации для синтеза и прецизионной модификации структуры и электронных свойств алмазоподобных углеродных плёнок.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Впервые установлено однозначное соответствие между параметрами зависимости Тауца ($(\alpha E)^{1/2} = B(E - E_{\text{гТ}})$) $E_{\text{гТ}}$ - шириной оптической псевдощели и B - коэффициентом, характеризующим наклон зависимости Тауца, с одной стороны, и концентрацией и характерными размерами графитоподобных нанокластеров с другой.
- Впервые предложена модель туннельных барьеров, позволившая получить зависимость низкотемпературной проводимости алмазоподобных плёнок от размера графитоподобных нанокластеров.
- Установлено, что доминирующими эффектами при ионной имплантации алмазоподобных углеродных (DLC) плёнок являются увеличение размеров нанокластеров и накопление радиационных дефектов. При этом последний эффект сдвинут в область более высоких доз облучения по сравнению с однородными по структуре материалами. Впервые установлено, что при облучении тяжёлыми ионами ($^{131}\text{Xe}^{++}$) при сверхнизких дозах облучения ($D < 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) происходит уменьшение концентрации и размеров нанокластеров, а имплантация ионов азота ($^{14}\text{N}^+$) приводит к существенному изменению как электронной, так и колебательной структуры графитоподобных нанокластеров.
- Обнаружен новый тип азот-углеродных графитоподобных нанокластеров.

Научная и практическая значимость:

- Применение ионной стимуляции растущей алмазоподобной углеродной плёнки под скользящими углами позволяет существенно упростить оборудование для ионно-лучевого синтеза алмазоподобных углеродных плёнок и вместе с тем получать плёнки с высоким содержанием алмазоподобной фазы.

- Предложенный режим осаждения, основанный на механизме каскадного перемешивания и образования переходного слоя плёнка/подложка на начальной стадии формирования плёнки, позволяет существенно повысить адгезионную прочность плёнок.
- Предложенная методика оценки концентрации и среднего размера графитоподобных нанокластеров по оптическим спектрам отражения и пропускания позволяет эффективно и бесконтактным способом оценивать содержание в плёнке алмазоподобной фазы, определяющей прочностные характеристики плёнок.
- Установлены режимы и параметры ионной имплантации, позволяющие в широких пределах управлять структурными характеристиками алмазоподобных углеродных плёнок.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Оригинальный метод и режим ионно-лучевого осаждения алмазоподобных плёнок.
- Метод оценки концентрации и среднего размера графитоподобных нанокластеров в алмазоподобной углеродной плёнке по оптическим спектрам отражения и пропускания.
- Результаты сравнительного анализа дозовых зависимостей концентрации и среднего размера графитоподобных нанокластеров при имплантации легких (^{12}C), тяжелых (^{131}Xe) и химически активных (^{14}N) ионов.
- Результаты исследования нового типа азот-углеродных графитоподобных нанокластеров.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на X международной конференции IBMM'96 (Albuquerque, USA, 1996); на XI международной конференции IBMM'98 (Amsterdam, The Netherlands, 1998); на X международной конференции REI-10 (Jena, Germany, 1999); на III международном симпозиуме ION2000 (Lublin, Poland, 2000); на 12 Международном симпозиуме "Тонкие плёнки в электронике". (Харьков, Украина, 2001); на VI Всероссийском семинаре "Физические и физико-химические основы ионной имплантации" (Н.Новгород, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, включая 6 статей в центральных и зарубежных журналах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу и 38 рисунков. Библиография включает 77 ссылок.

Основное содержание работы

Во введении к диссертации дано обоснование актуальности темы выполненных исследований, сформулирована цель и вытекающие из нее задачи диссертационной работы. Кратко изложено содержание каждой из глав.

В первой, обзорной главе кратко рассмотрены основные методы синтеза алмазоподобных углеродных плёнок, их структурные и оптические характеристики. При этом основное внимание уделено работам по исследованию алмазоподобных плёнок, полученных с применением ионных пучков.

Вторая глава посвящена описанию использованных в работе экспериментальных методик. Особое внимание при этом уделено анализу возможности применения оптической спектроскопии отражения и пропускания для изучения алмазоподобных углеродных плёнок, Экспериментальная зависимость коэффициента поглощения, α , описывается зависимостью Тауца:

$$(\alpha E)^{1/2} = B(E - E_{gt}) \quad (1)$$

Эта зависимость позволяет определить величину эффективной оптической щели Тауца E_{gt} и коэффициент B , которые, в свою очередь, как это показано в 4-й главе, определяются средним размером и концентрацией нанокластеров и, таким образом, могут служить характеристиками структуры алмазоподобных углеродных плёнок.

Далее кратко описаны эллипсометрия и спектроскопия комбинационного рассеяния алмазоподобных плёнок, методики исследования их структуры, фазового состава, измерения температурной зависимости электросопротивления, термического отжига в атмосфере азота и в вакууме, а также методика и техника ионной имплантации.

В третьей главе приведено описание разработанной и изготовленной в ходе работы оригинальной установки для осаждения алмазоподобных углеродных плёнок методом ионно-лучевого распыления графитовой мишени. Основным элементом установки является источник ионов типа источника Кауфмана, позволяющий получать пучки ионов инертных газов и азота диаметром до 100 мм с энергией в интервале (0,1-1,7) кэВ и плотностью ионного тока до 500 мкА/см². Плёнки осаждались на подложки из стекла, кварца, кремния и NaCl. Типичная скорость осаждения составляла ~2 нм/мин.

Для увеличения содержания в плёнке алмазоподобной фазы необходима ионная стимуляция растущей плёнки, т.е. дополнительное облучение её низкоэнергетичным (~100 эВ) ионным пучком. В отличие от известных работ нами был использован оригинальный приём, основанный на явлении многократного малоуглового рассеяния падающих под скользящим углом высокоэнергетичных ионов. Это позволило существенно упростить экспериментальное оборудование за счёт использования одного и того же источника ионов и для распыления графитовой мишени, и для ионной стимуляции растущей плёнки. Кроме того, нами разработан оригинальный режим осаждения плёнок, при котором реализуется эффект ионного перемешивания на начальной стадии формирования плёнки. Благодаря этому была решена весьма острая для алмазоподобных плёнок проблема адгезии.

Результаты исследований по оптимизации параметров осаждения показали, что наиболее качественные плёнки синтезируются при использовании ионов ксенона с энергией 1 кэВ, оптимальный угол стимуляции растущей плёнки - 1 градус. При этом режиме синтезируются плёнки с эффективной оптической щелью Тауца $E_{гт} \approx 1,2$ эВ, $n \approx 2$, $k < 0,05$ в видимой области спектра.

Для того, чтобы связать экспериментально определяемые параметры B и $E_{гт}$ с концентрацией и размерами нанокластеров, нами была разработана теоретическая модель, которая представлена в главе 4.

Согласно этой модели коэффициент поглощения одного графитоподобного нанокластера равен:

$$\alpha(\omega) = (\pi e^2 / m_e c) \phi(\omega) J(\omega), \quad (2)$$

где $\Phi(\omega)$ - сила осциллятора, $J(\omega)$ - комбинированная плотность состояний π -электронов одного нанокластера:

$$J(\omega) \approx \int N_C(\omega') N_V(\omega' - \omega) d\omega', \quad (3)$$

где $N_C(\omega')$ и $N_V(\omega')$ - плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне кластера, соответственно. С учётом особенностей плотности состояний π -электронов [1], нами была смоделирована функция, которая по крайней мере качественно правильно описывает распределение комбинированной плотности состояний π -электронов по энергии и её зависимость от размера нанокластера. Далее считалось, что среда состоит из набора нанокластеров с концентрацией N_0 и прямоугольным распределением по E_g . При условии $\Delta E_g / E_{g0} < 1$ для области $E_{g0} + AE_g < E < E_1 = (3E_0 + E_{g0})/4$ коэффициент поглощения такой среды описывается выражением, аналогичным зависимости Тауца:

$$Ea(E) = N_0 B(E_{g0})(E - E_{g0})^2 \quad (4)$$

$$B(E_g) = 0.5 \cdot 10^{16} (E_0/E_g)^{3/2} [\text{эВ см}^{-1}]''' \quad (E < 3\text{эВ}), \quad (5)$$

где E_{g0} - среднее значение оптической щели кластеров, ΔE_g - полуширина их распределения. Как и ожидалось, параметр B определяется концентрацией π -кластеров. Кроме того, B является также функцией E_{g0} , и эта зависимость наиболее существенна в области $E_{g0} < 1$ эВ, что противоречит экспериментальным данным. Однако, если предположить, что по мере увеличения размера π -кластера уменьшение оптической щели происходит быстрее, чем это считалось ранее ($E_g \sim (N_0)^{1/2}$), то это противоречие может быть преодолено. Например, зависимость $E_g \sim (N_0)^{-1}$ приводит к соотношению $B \sim (E/E_g)^{0.7}$, т.е. к ослаблению зависимости от E_g . В этом случае для кластеров с $E_g < 1$ эВ окончательно получаем:

$$Ea(E) = 5.2 \cdot 10^{16} N_0 (E - E_{g0})^2 \quad (6)$$

Это соотношение позволяет оценить концентрацию π -кластеров в образце и концентрацию атомов углерода, которые входят в состав нанокластеров. Наши исходные образцы, приготовленные согласно рекомендациям, изложенным в третьей главе, имеют $E_{g1} \approx (1 \pm 1.2)$ эВ, $B \approx 6.2 \times 10^4 \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Тогда, $N_0 \approx 1.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_C \approx 2 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, проведенные оценочные расчёты оптического поглощения π -кластеров хорошо описывают полученные нами экспериментальные результаты по оптическому

поглощению алмазоподобных плёнок, а проведенные на их основе оценки концентрации кластеров дают вполне реальные и разумные величины.

В пятой главе приводятся результаты по исследованию влияния массы и химической природы внедряемых методом ионной имплантации ионов на структурные параметры алмазоподобных углеродных плёнок.

В первом параграфе представлены результаты по исследованию алмазоподобных плёнок, облучённых ионами углерода $^{12}\text{C}^+$ с энергией 20 кэВ. Энергетические потери ионов углерода в углеродной матрице $\sim 14 \text{ эВ}/\text{\AA}$, энергия смещения атома в графите $\sim 40 \text{ эВ}$, в алмазе $\sim 80 \text{ эВ}$. Поэтому с увеличением дозы ионной имплантации накопление радиационных дефектов происходит равномерно по всему объёму плёнки и данный режим имплантации называют имплантацией легких ионов. Результаты оптических измерений образцов, облучённых дозами ионов в интервале от $6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $1.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ показали, что концентрация я-кластеров в плёнке при облучении ионами углерода остается практически постоянной. При этом на дозовой зависимости оптической щели, отражающей изменение среднего размера л-кластеров с увеличением дозы имплантации, можно выделить три характерных интервала. При дозах $D \leq 6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ величина $E_{\text{гТ}}$ не меняется. В области доз $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} < D < 1.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается быстрое уменьшение $E_{\text{гТ}}$ от 1.2 эВ до -0.43 эВ. В области $D > 1.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ происходит медленное, приблизительно линейное по дозе дальнейшее уменьшение $E_{\text{гТ}}$. Наблюдаемую дозовую зависимость $E_{\text{гТ}}$ можно объяснить следующим образом. При накоплении определенного количества вакансий начинается быстрый рост кластеров путем спонтанного перехода sp^3 -конфигурации в sp^2 -конфигурацию. В этом случае необходим некоторый подготовительный этап ($D < 10^{14} \text{ см}^{-2}$). Очевидно, что замедление скорости роста связано с тем, что все или подавляющая часть атомов углерода связывается кластерами.

Как известно, изучение температурной зависимости сопротивления нанокompозитных материалов позволяет получить дополнительную информацию об их структуре. В связи с этим нами были проведены измерения температурной зависимости сопротивления облучённых образцов. Было установлено, что температурная зависимость сопротивления у всех облученных образцов

подчиняется закону Мотта ($R=R_0 \exp(T_0/T)^{1/4}$, $T_0 = 16a^3/kN(E_F)$, где k - постоянная Больцмана, $N(E_F)$ - плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми, $a=2\pi(2m_e\Delta E)^{1/2}/\hbar=2\pi(m_e E_g)^{1/2}/\hbar$ - параметр туннелирования), причём ход дозовой зависимости параметра $T_0^{1/4}$ полностью повторяет ход дозовой зависимости ширины эффективной оптической щели, уменьшаясь в интервале доз $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \leq D \leq 1.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ от $\sim 1200 \text{ К}^{1/4}$ до $\sim 180 \text{ К}^{1/4}$. Проведённые численные оценки показали, что средний размер нанокластеров через параметр туннелирования a оказывает более сильное влияние на параметр проводимости T_0 и, соответственно, проводимость подвергнутой имплантации плёнки, чем концентрация возникающих при имплантации дефектных состояний $N(E)$. Этот результат служит дополнительным подтверждением предложенного нами объяснения для хода дозовой зависимости $E_{\text{гТ}}$ -

Во втором параграфе представлены результаты по исследованию влияния на микроструктуру алмазоподобных плёнок бомбардировки тяжелыми ионами $^{131}\text{Xe}^{++}$ с энергией 80 кэВ. Энергетические потери этих ионов в углеродной мишени $-dE/dx \approx 240 \text{ эВ/А}$, что более чем на порядок выше энергетических потерь ионов углерода ($E=20 \text{ кэВ}$) - 14 эВ/А . В этом случае генерация дефектов происходит преимущественно вблизи треков ионов $^{131}\text{Xe}^{++}$ в так называемых плотных каскадах атомных смещений. Это приводит к трём существенным отличиям в поведении оптических параметров и, соответственно, микроструктуры алмазоподобных плёнок по сравнению со случаем бомбардировки легкими ионами углерода. Во-первых, уже при дозах $6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ наблюдается заметное уменьшение концентрации графитоподобных нанокластеров, о чем свидетельствует уменьшение параметра B от $\sim 6.2 \times 10^4$ до $\sim 4.5 \times 10^4 \text{ эВ}^{-1} \text{ см}^{-1}$. При дальнейшем увеличении дозы параметр B не меняется. Далее идёт этап, когда наиболее существенным становится эффект уменьшения размеров нанокластеров, о чём свидетельствует увеличение $E_{\text{гТ}}$ до $\sim 1.4 \text{ эВ}$ в интервале доз от $6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ до $6 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Уменьшение размеров нанокластеров связано, как мы полагаем, с эффектом баллистического растворения в условиях плотного каскада атомных смещений. Последнее отличие состоит в том, что облучение ионами ксенона дозами, превышающими $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, приводит к дальнейшему уменьшению

величины $E_{\text{гТ}}$ и она становится отрицательной. Мы полагаем, что в этой области доз облучения наиболее существенным становится процесс накопления радиационных дефектов. В результате эффективная оптическая щель образца заполняется дефектными состояниями, которые дают дополнительный вклад в оптическое поглощение. В пользу предложенной модели свидетельствуют данные по термическому отжигу в вакууме образцов с $E_{\text{гТ}} < 0$. Отжиг при $T=350^\circ\text{C}$ в течение 15 мин. приводил к увеличению оптической щели до $-0,7$ эВ.

В третьем параграфе исследована более сложная ситуация, а именно, влияние на структурные параметры среды процесса ионного синтеза углеродсодержащих фаз. В этом отношении наибольший интерес представляет имплантация азота, т.к. масса атомов азота близка к массе атомов углерода и поэтому баллистические эффекты при имплантации азота и углерода идентичны. Анализ результатов оптических измерений показал, что в области доз $D > 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается очень медленное увеличение $E_{\text{гТ}}$, что можно трактовать как медленное уменьшение размеров нанокластеров, связанное с ионным синтезом нитридной фазы $(\text{CN})_2$ - циана. В интервале $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \leq D \leq 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдается уменьшение параметра B приблизительно на 30% и увеличение параметра проводимости Мотта $T_0^{1/4}$. Поскольку этот эффект имеет ступенчатый характер, то естественнее всего приписать его не ионному синтезу новой фазы, а изменению электронной структуры части нанокластеров, вызванного взаимодействием нанокластеров с азотом. Из данных комбинационного рассеяния было установлено, что в спектрах имплантированных ионами азота плёнок появляется новая линия КР при 928 см^{-1} . Эта линия присутствует и в спектрах КР алмазоподобных плёнок, термически отождённых в потоке азота с небольшой примесью кислорода. При отжиге существенно модифицируются и оптические свойства плёнок - коэффициент поглощения в видимой области уменьшается на 2-3 порядка, что свидетельствует о том, что и в этом случае происходит модификация электронной структуры нанокластеров. Из вышеизложенного был сделан вывод, что основные механизмы наблюдаемых изменений электронной структуры и КР спектров алмазоподобных плёнок и при ионной имплантации азота и при термическом отжиге в атмосфере азота одни и те же. Поэтому, для их дальнейшего изучения,

учитывая, что процессы, протекающие при термическом отжиге, значительно проще и не столь комплексны, мы провели целую серию детальных исследований влияния условий отжига алмазоподобных плёнок на оптические свойства и КР спектры, результаты которых изложены в четвёртом параграфе.

Было установлено, что модификация структуры и свойств алмазоподобных плёнок при термическом отжиге протекают в два этапа. На первом этапе происходит формирование нанопористой плёнки за счет реакции углерода с примесным кислородом с образованием CO_2 . Об этом свидетельствует существенное уменьшение показателя преломления (от 2 до 1.4). На втором этапе происходит диффузия азота в плёнку по нанопорам и изменение всех свойств углеродной плёнки. Эти изменения носят обратимый характер. Повторный отжиг, но в условиях вакуума, приводит, сначала, к полному восстановлению КР спектров, а затем - и оптических свойств. Полученные данные в целом позволили сделать вывод о том, что наблюдаемые изменения связаны с адсорбцией молекул азота на поверхности графитоподобных нанокластеров по интеркаляционному механизму и формированием нового типа углерод-азотных нанокластеров.

В заключении изложены основные результаты и выводы.

Основные результаты и выводы

1. Разработан и практически реализован оригинальный метод синтеза алмазоподобных плёнок углерода, основанный на одновременном облучении одним и тем же пучком быстрых ионов графитовой мишени в режиме интенсивного её распыления, а подложки - в режиме многократного малоуглового рассеяния для реализации процесса ионно-стимулированного осаждения распыляемых атомов углерода и роста формируемой плёнки.
2. Предложен и апробирован новый режим ионно-стимулированного осаждения алмазоподобных плёнок углерода, обеспечивающий их высокую адгезионную прочность, основанный на создании на начальном этапе формирования плёнки переходного слоя с использованием для этого эффекта каскадного (баллистического) перемешивания атомов плёнки и подложки.
3. В рамках модели нанокластерной структуры алмазоподобных плёнок углерода впервые выполнены расчёты коэффициента поглощения плёнок в

видимом и ближнем УФ диапазонах длин волн.

Установлено однозначное соответствие между параметрами зависимости Тауца ($(\alpha E)^{1/2} = B(E - E_{гТ})$), а именно, между $E_{гТ}$ - шириной оптической псевдощели и коэффициентом, характеризующим наклон зависимости Тауца - B , с одной стороны, и концентрацией и характерными размерами графитоподобных нанокластеров с другой, что позволяет бесконтактным способом определять эти важные характеристики алмазоподобных плёнок из результатов оптических измерений.

Показано, что известная зависимость оптической щели от размера нанокластера должна быть модифицирована в случае больших нанокластеров, средний размер которых превышает 2.5 нм.

4. Предложена модель туннельных барьеров, позволившая получить зависимость низкотемпературной проводимости алмазоподобных плёнок от размера графитоподобных нанокластеров, которая вполне корректно описывает экспериментально полученные температурные зависимости сопротивления.
5. Изучено влияние параметров ионной имплантации (доза облучения, масса иона, химическая активность атома) на микроструктуру и соответственно на оптические и электрические свойства алмазоподобных плёнок углерода и установлены следующие основные закономерности и особенности в их поведении:
 - показано, что оптические и электрические свойства проявляют сильную зависимость от дозы облучения, что обусловлено изменением размеров нанокластеров и, соответственно, их электронной структуры (квантово-размерный эффект);
 - обнаружено, что доминирующими эффектами являются увеличение размеров нанокластеров и накопление радиационных дефектов. При этом последний эффект сдвинут в область более высоких доз облучения по сравнению с однородными по структуре материалами;
 - впервые установлено, что при облучении тяжелыми ионами ($^{131}\text{Xe}^{++}$) при сверхнизких дозах облучения $\sim (10^{12} - 10^{13}) \text{ см}^{-2}$ возникают

специфические особенности - уменьшение концентрации и размеров нанокластеров, что проявляется в уменьшении коэффициента поглощения и увеличении оптической щели алмазоподобных плёнок;

- установлено, что имплантация азота приводит к существенному изменению как электронной, так и колебательной структуры графитоподобных нанокластеров.

6. Обнаружены существенные изменения колебательного спектра и оптических свойств углеродных плёнок при термическом отжиге (400 °C) в атмосфере азота с примесью кислорода, сходные с наблюдаемыми при ионной имплантации азота. Эти изменения носят обратимый характер.

Установлено, что модификация плёнок идет, по крайней мере, в два этапа: на первом этапе формируется наногористая углеродная плёнка; на втором — диффузия молекул азота по нанопорам и их адсорбция на поверхности графитоподобных нанокластеров.

Предложена качественная модель, объясняющая наблюдаемые изменения, основанная на взаимодействии адсорбированных молекул азота с графитоподобными нанокластерами по интеркаляционному механизму с формированием нового типа азот-углеродных нанокластеров.

Список цитированной литературы

1. Robertson J. and O'Reilly E.P. Electronic and atomic structure of amorphous carbon // Phys.Rev.B. - 1987. Vol.35. - P.2946-2957.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Faizrakhmanov LA., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Khaibullin I.B. Optical and electrical properties of C-implanted amorphous diamond-like carbon films // Abstracts of X Int. Conf. on Ion Beam Modification of Materials. -1-6 September 1996, Albuquerque, USA. - 1996. - P. F20.
2. Faizrakhmanov LA., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Khaibullin I.B. Optical and electrical properties of C⁺-implanted amorphous diamond-like carbon films // Nud. Istr. and Meth. in Phys. Res.(B). - 1997. - V.B127 - P.719-722.
3. Faizrakhmanov LA., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Khaibullin I.B. The investigation of optical and electrical properties of N⁺-implanted amorphous

- diamond-like carbon (DLC) films // Abstracts of XI Int. Conf. on Ion Beam Modification of Materials. - August 31 - September 4, Amsterdam, The Netherlands, 1998.-P.134.
4. Faizrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Khaibullin I.B. The investigation of optical and electrical properties of N^+ -implanted DLC films // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.(B).- 1999. - V.B148. - P. 669-672.
 5. Faizrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Khaibullin I.B. Influence of Xe-ion irradiation on microstructure of diamond-like carbon films // Abstract of 10 Int. Conf. on Radiation Effects in Isolators. - Jena, Germany, 1999. - P.181.
 6. Faizrakhmanov I., Bazarov V., Zhikharev V., Khaibullin I. Influence of Xe^+ -ion irradiation on microstructure of diamond-like carbon films // Abstracts of III Int. Symp ION2000. - Lublin, Poland, 2000. - P.29.
 7. Faizrakhmanov I.A., Bazarov V.V., Zhikharev V.A., Stepanov A.L., Khaibullin I.B. Influence of Xe^+ -ion irradiation on the microstructure of diamond-like carbon films // Vacuum. - 2001. - V.62. - P. 15-19.
 8. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Жихарев В.А., Хайбуллин И.Б. Влияние бомбардировки ионами углерода на микроструктуру алмазоподобных плёнок // Физика и техника полупроводников. - 2001. - Т.35. - №5. - С.612-618.
 9. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Хайбуллин И.Б. Исследование методом оптической спектроскопии микроструктуры плёнок а-С, полученных ионно-стимулированным осаждением // Алмазные плёнки и плёнки родственных материалов (Сборник докладов 12-го Международного симпозиума "Тонкие плёнки в электронике"). - Харьков:ИПЦ "Контраст", 2001. 344 с. - С. 137-140.
 10. Щеглов И.Ю., Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Стрельников Ю.П., Хайбуллин И.Б. Синтез алмазоподобных плёнок методом PCVD для просветления германия // Алмазные плёнки и плёнки родственных материалов (Сборник докладов 12-го Международного симпозиума "Тонкие плёнки в электронике"). - Харьков:ИПЦ "Контраст", 2001. 344 с. - С. 160-162.
 11. Файзрахманов И.А., Курбатова Н.В., Базаров В.В., Галяутдинов М.Ф., Хайбуллин И.Б. Влияние отжига в атмосфере азота на колебательный спектр и оптические свойства углеродных плёнок // Алмазные плёнки и плёнки родственных материалов

У
(Сборник докладов 12-го Международного симпозиума "Тонкие плёнки в электронике"). - Харьков:ИПЦ "Контраст", 2001.344 с. - С.202-206.

12. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Курбатова Н.В., Хайбуллин И.Б. Синтез новых углерод-азотных нанокластеров при имплантации ионов азота в алмазоподобные плёнки углерода // VI Всероссийский семинар "Физические и физико-химические основы ионной имплантации": Тез.докл. - Н.Новгород, 2002.-С.40-41.
13. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Курбатова Н.В., Хайбуллин И.Б. Влияние термического отжига в атмосфере азота на оптические свойства и колебательный спектр графеновых наноструктур // Казанский физико-технический институт им. Е.К.Завойского 2001. Ежегодник. - Казань: ФизтехПресс, 2002. 248 с. - С. 50-52.
14. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Курбатова Н.В., Хайбуллин И.Б., Степанов А.Л. Синтез новых углерод-азотных нанокластеров при термическом отжиге в атмосфере азота алмазоподобных плёнок углерода // Физика и техника полупроводников. - 2003. - Т.37. - С.230-234.
15. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Степанов А.Л., Хайбуллин И.Б. Модификация наноструктуры алмазоподобных плёнок углерода бомбардировкой ионами ксенона // Физика и техника полупроводников. - 2003. - Т.37. - С.748-752.
16. Файзрахманов И.А., Базаров В.В., Курбатова Н.В., Хайбуллин И.Б. Синтез углерод-азотных нанокластеров при имплантации ионов азота в алмазоподобные плёнки углерода // Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского 2002. Ежегодник. - Казань:ФизтехПресс, 2003. 235 с. - С.68-71.